

智能水下机器人研究进展

庞硕, 纠海峰

哈尔滨工程大学水下机器人技术重点实验室, 哈尔滨 150001

随着机器人技术的进步和海洋开发需求的日益加强, 智能水下机器人技术已经成为世界各国致力发展的技术领域。本文介绍国内外智能水下机器人的发展现状与发展趋势, 分析智能水下机器人的关键技术及未来的发展方向。

海洋是生命的摇篮、资源的宝库、交通的要道, 占地球表面积71%的海洋是人类发展的四大战略空间(陆、海、空、天)中继陆地之后的第二大战略空间, 同时也是一个富饶而远未得到充分开发的宝藏。海洋蕴藏着丰富的能源、生物资源和金属资源, 是人类社会可持续发展的重要财富, 是目前最现实、最具发展潜力的战略空间。随着智能水下机器人(Autonomous Underwater Vehicle, AUV)技术的发展, 必将使海洋开发进入新的时代。

智能水下机器人是一种无人无缆的潜水器载体, 它将人工智能、探测识别、信息融合、智能控制、模式识别、系统集成等技术应用于同一水下载体上, 在无人控制的情况下自主完成预定任务。智能水下机器人由于在实际作业中无需人工干预, 可以自主地运行在无法预知的海洋环境中, 完成自主行为决策和自主路径规划等任务, 无论在民用上还是军事上都有无可比拟的优越性。

1 智能水下机器人国内外发展现状

1.1 国外发展现状

20世纪80年代末, 随着人工智能技术、微电子技术、控制硬件和计算机技术等方面的进步, 智能水下机器人技术得到了迅猛发展。在智能水下机器人技术的研究方面, 许多沿海国家尤其

是发达国家都致力于智能水下机器人技术研发和产品研发。美国、英国、日本、加拿大、俄罗斯等国家, 成立了专门的研发机构。最著名的研究院所有: 美国伍慈霍尔海洋研究所(Woods Hole Oceanographic Institute), 美国海军研究生院智能水下机器人研究中心(Center for Autonomous Underwater Vehicle Research), 美国麻省理工学院的智能水下机器人实验室(MIT Sea Grant's AUV Lab), 英国的海洋技术中心(Marine Technology Center), 日本东京大学的水下机器人应用实验室(Underwater Robotics Application Laboratory)等。同时, 一些国际的专业协会也为推动智能水下机器人技术的发展做出了一定的贡献, 如: IEEE机器人和自动化协会(IEEE Robotics and Automation), IEEE海洋工程协会(IEEE Ocean Engineering Society)等。

美国康斯伯格公司的Remus(Remote Environment Monitoring Units)系列智能水下机器人, 是最成功的智能水下机器人系列之一, 具有Remus-100, Remus-600和Remus-6000等多个型号。Remus-6000最大工作水深为6000 m, 是一个高度模块化系统, 代表了目前智能水下机器人的最高水平。Remus系列智能水下机器人因为其优越的性能, 已经被多个国家所采购。科研工作者们利用Remus智能水下机器人完成了大量的海洋环境观察和数据采集试验, 图1^[1-3]为Remus-100和Remus-6000智能水下机器人。

2009年, 法航447号航班在大西洋近赤道海域上空失踪, 调查人员花费了整整2年的时间也没有找到飞机的黑匣子。2011年调查团队首次将Remus-6000智能水下机器人投入到搜索黑匣子任务中, 调查人员绘制出接近于飞机

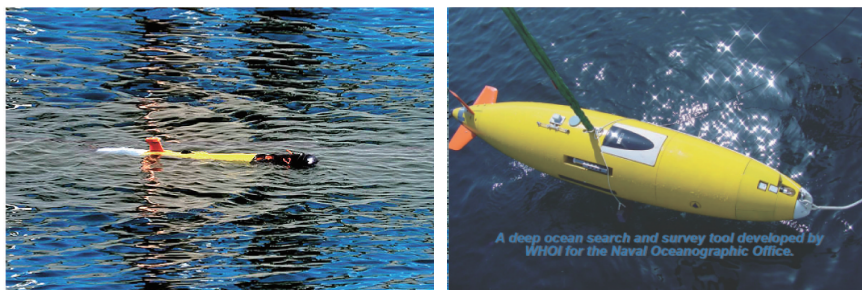


图1 Remus-100(左)和Remus-6000(右)智能水下机器人

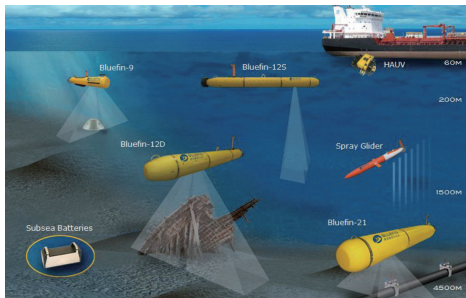


图2 蓝鳍金枪鱼智能水下机器人系列作业示意



图3 Alister智能水下机器人



图4 Hugin3000智能水下机器人

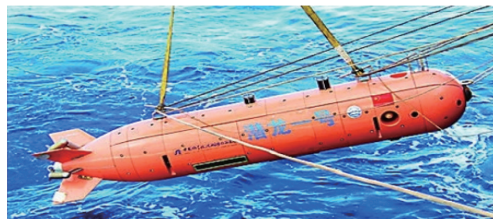


图5 “CR-01”（左）和“潜龙-1号”（右）智能水下机器人

失踪位置的搜索网格图,机器人能够精确地沿着搜索网格线自动行驶。在Remus-6000加入调查不到一个星期的时候,这台机器人拍到了在一个深海平原上的大量飞机残骸。至此,调查人员找到了法航447航班客机。这次搜索的成功,展示出智能水下机器人在水下搜索方面的巨大优势^[4]。

美国蓝鳍水下机器人公司研制的蓝鳍金枪鱼智能水下机器人(Bluefin-AUV)按照直径分为9英寸(约23 cm)、12英寸(约30 cm)和21英寸(约53 cm)3种,质量50~750 kg,最大工作水深200~4500 m,续航能力12~30 h,可装备多种传感器,用于水雷探测、海底地形地貌探测、海底沉积物探测、海底管道跟踪和海洋环境数据采集等,如图2所示。2014年4月,美国利用Bluefin-21型智能水下机器人在南印度洋海域,开始进行马航MH-370客机残骸的搜索工作,目前已完成水下核心区搜索任务的95%,仍没有重大发现(www.bluefinrobotics.com)。

法国ECA公司研制的Alister智能水下机器人,长约4.5 m,空气中质量约为900 kg,巡航速度为4节(节是水中载体速度单位,1节约等于1.852 km/h=0.514 m/s),最大工作水深为300 m,续航力为12~20 h,并且能够进行自主导航。通过搭载相应的传感器,Alister智

能水下机器人可以自主完成目标区域监视和绘图等任务,图3(图片引自www.eca.fr/en/robotie-vehicule/roboties-naval-auv-alister-autonomous-underwater-vehicule/2.htm)为Alister智能水下机器人出水的照片。

挪威康斯堡·西姆莱德公司研制的Hugin智能水下机器人系列可提供海底地形调查及多项水下探测作业服务,现已为8个国家完成了约3万km的探测作业。Hugin系列共有:Hugin1,Hugin1000,Hugin3000这3种智能水下机器人。以技术最为成熟的Hugin3000型智能水下机器人为例,其长为5.35 m,最大直径为1 m,空气中质量约为1400 kg,巡航速度为4节(约2 m/s),最大工作水深为3000 m。携带的电池可维持约60 h的水下自主航行,续航力约为440 km。Hugin具有惯性导航系统、超短基线或长基线定位系统,以及多种传感器,包括:多普勒测速仪、压力传感器、感度计、前视声纳等,图4^[5-7]所示为Hugin3000智能水下机器人。

1.2 国内发展现状

国内在智能水下机器人技术研究方面,主要研究机构有:中国科学院沈阳自动化研究所、哈尔滨工程大学智能水下机器人技术重点实验室和中船重工710所等。从1992年6月起,中国科学院沈阳自动化研究所联合国内若干

单位与俄罗斯展开合作,在俄罗斯MT-88智能水下机器人的基础上,针对国内对国际海底资源调查的需要,研制开发了“CR-01”型最大潜深6000 m、续航力约10 h的智能水下机器人,并于1997年6月,成功完成了太平洋某区域的深海考察。“CR-01”的研制成功,使中国智能水下机器人总体技术水平跻身世界先进行列,成为世界上拥有潜深6000 m智能水下机器人的少数国家之一。在此基础上,中国科学院沈阳自动化研究所联合国内若干单位在20世纪90年代后期又成功研制了“CR-02”型智能水下机器人。在“十二五”期间,在大洋协会的支持下,中国科学院沈阳自动化研究所对“CR-02”进行了改造与设备更新,构成了新的“潜龙-1号”智能水下机器人,在2节(约1 m/s)航速下最大续航能力增大到24 h,并搭载了浅地层剖面仪等探测设备,可完成海底微地形地貌精细探测、底质判断、海底水文参数测量和海底多金属结核丰度测定等任务。“潜龙-1号”是目前国内唯一具有6000 m深海探测能力的智能水下机器人,图5所示为“CR-01”和“潜龙-1号”智能水下机器人^[8,9]。

中船重工710所研制了多型中等潜深(几百米范围)的智能水下机器人,近年来,又研制了多功能远程自主运载智能水下机器人、搭载合成孔径声纳的



图6 710所研制的2款智能水下机器人

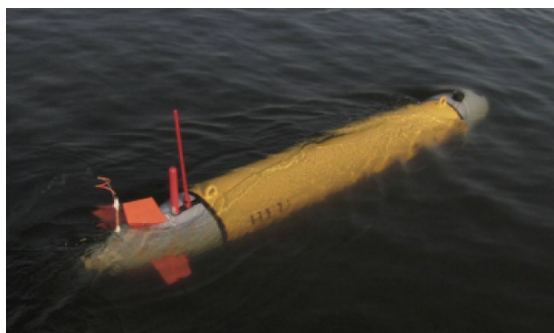


图7 2款某系列微型智能水下机器人

智能水下机器人等,并在智能水下机器人的工程化方面也取得了相应的业绩。图6所示为710所研制的2款智能水下机器人。

哈尔滨工程大学智能水下机器人技术重点实验室从20世纪90年代起,开始进行智能水下机器人技术的研究工作,重点围绕运动控制、智能规划与决策、水下目标的探测与识别、信息融合与理解、系统设计与集成等方面进行技术开发和人才培养。目前,哈尔滨工程大学智能水下机器人技术重点实验室已经成为国内领先的智能水下机器人技术研究基地。研制有某系列微型智能水下机器人、某系列中型智能水下机器人以及应用于海洋探测的大型综合探测水下机器人。

近年来研制出某系列多款微型智能水下机器人样机,可搭载成像声纳和微光摄像机,能够在复杂海洋环境下完成自主侦查与探测任务,如图7所示为该系列2款微型智能水下机器人。

图8所示为最新研制的某微型智能水下机器人,其主要功能为依靠自身搭载的侧扫声纳系统对指定区域进行自主搜索探测和跟踪观察,可用于海

洋环境监测、寻找失事舰船、探测打捞等多项任务。

某系列中型智能水下机器人是重点实验室的重要研制系列,2000年夏,研制的某中型智能水下机器人在海洋环境下实现了自主识别水下目标、自主避碰、自主规划安全航行路线和模拟自主作业5项功能演示。2003—2005年,研制的某中型智能水下机器人进行了多次海上试验,在真实海洋环境下完成了长距离的自主航行,实现了自主识别水下目标及绘制目标图、自主规划航行路线和模拟自主清除目标等多项功能。该型智能水下机器人采用了锂电池作为能源,具有水声通信能力,导航系统采用了光纤罗经、多普勒速度计、深度计、高度计等。2009—2011年,经过两次海上试验和为中海油的一次海底井口探测试验,某中型智能水下机器人,完成了长距离的水下中继通信、水下单目标的自主声学跟踪、海底地形地貌自主探测、海底沉船自主探测等功能演示,图9所示为3款某系列中型智能水下机器人。

最新研制潜深2000 m的海洋探测智能水下机器人,已完成南海2000 m

深潜试验和指定区域内的深海探测试验,实现海洋油气管道的自主探测、海底表面特征测量、海底地形地貌的探测扫描和海底浅层剖面测量等技术目标。该型智能水下机器人设计最大航速为5节(约2.5 m/s),续航力200 km,搭载的探测传感器有前视声纳、多波束声纳、侧扫声纳、浅层剖面声纳等,图10所示为2000 m海洋探测智能水下机器人南海试验照片。

“海灵”号海洋探测智能水下机器人于2013年9月12日—2013年9月16日在南海进行了试验。试验期间,完成了航行能力测试、导航精度测试以及安全自救测试等项目,以40 m潜深完成了40 h,249 km的续航力测试,并完成了500 m浅航试验。在国内首次实现了水下机器人搭载承压锂电池,可根据作业需求进行设备与能源的模块化搭载。图11为“海灵”号海洋探测智能水下机器人南海试验的照片。

以“海灵”号为基础,研制的500 kg级智能水下机器人,在2015年10月18—20日的海试过程中,完成了智能水下机器人与对接台的水下对接试验。试验过程中,智能水下机器人通过



图8 某微小智能水下机器人及其试验

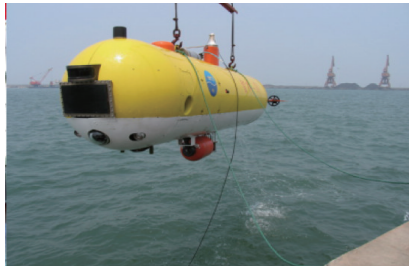


图9 3款某系列中型智能水下机器人



图10 2000 m海洋探测智能水下机器人南海试验

水声引导定位、导航控制技术,将自身的姿态调整到与平台入口一致,从而顺利进入喇叭状的对接台内部,进行水下无线信息传输和水下无线充电,图12为对接示意

2 智能水下机器人关键技术

1) 先进设计制造技术。

随着智能水下机器人产业化年的发展,越来越多的智能水下机器人将作为产品出售,先进设计制造技术逐渐发展为智能水下机器人研究的关键技术。先进设计制造技术应用在智能水下机器人主要体现在载体的模块化方面,目前模块化设计主要分为两种类型:

(1) 载体外形一体化,内部设备进行模块化设计;(2) 外形和设备分段进行模块化设计。第1种类型在载体设计上主要考虑外形的水动力性能,第2种类型在设计上主要考虑的是功能性,根据任务的不同选取不同的设备模块进行安装。

2) 能源与推进技术。

能源与推进技术是智能水下机器人在续航能力问题上的关键技术。能源方面:锂电池(一次性或可充电)是目前智能水下机器人系统广泛使用的能源,少量系统采用银锌电池(可充电)或燃料电池。锂电池可采用耐压舱封装或承压式封装两种形式。推进方面:目

前智能水下机器人系统主要采用低噪声、高效率的螺旋桨作为推进器,少量系统采用滑翔式或喷水推进。能源方面和推进方面在智能水下机器人续航能力问题是相辅相成的,大容量的锂电池可以增加机器人在水下航行的时间,可以完成更多的任务,而高效率的推进系统可以提高机器人在运行过程中的推进效率,使得智能水下机器人在能源相同的情况下航行更远的距离。

3) 水下导航技术。

水下无人系统的导航技术可以分为基于外部信息的导航和基于自身传感器的导航两类。基于外部信息的导航,如罗兰 C、GPS、北斗、USBL、LBL

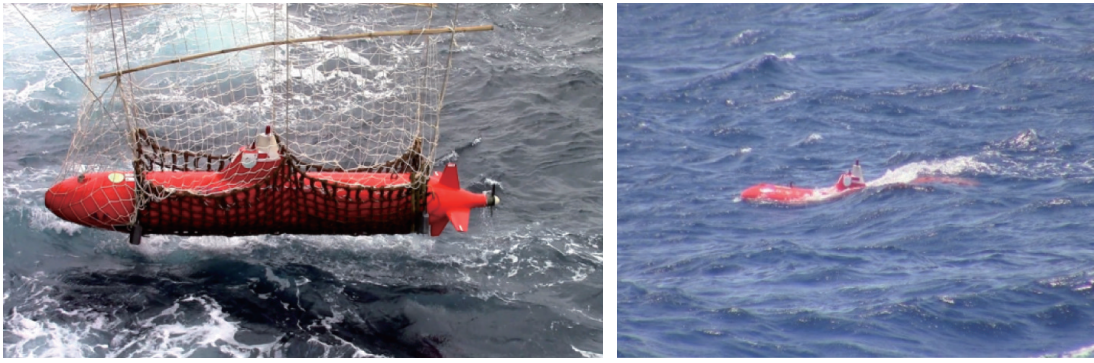


图11 “海灵”号海洋探测智能水下机器人南海试验

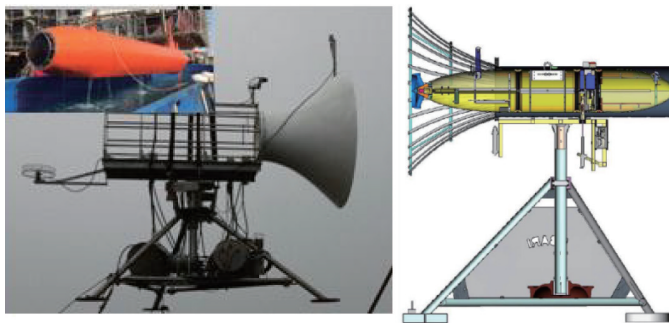


图12 水下对接设备、对接示意

等,适用于系统在水面航行或在水下航行但有水面支持母船の場合,传感器能接收到外部信号的情况下,才能得到导航数据。基于传感器的导航方式是当智能水下机器人在水下航行时,依靠系统内部的传感器进行导航而无需接受外部信号。该导航方式又可分为船位推算、惯导系统、基于地形信息导航等。

4) 水下通信技术。

由于受到海水的影响,水下通信目前还主要依靠水下通信声纳,只有极少部分智能水下机器人系统采用光或激光进行近距离的相互通信。受能源的制约,智能水下机器人系统能够搭载的通信声纳都是小型、低功耗的,因而,它们的换能器功率有限,发出的声波能传播的距离有限。浅海的高速水声通信更是困难,其面临最困难的问题就是多途干扰和由于海洋表面反射、内波等引起的快速时变。

水下通信技术是目前制约智能水下机器人发展的瓶颈技术。

5) 水下环境感知技术。

水下感知技术是指智能水下机器

人通过搭载的光学和声学传感器对未知区域进行环境识别,由于水下环境自身的特殊性,使得智能水下机器人在环境感知方面的研究进展较慢。水下环境具有如下的特殊性:由于时间和水下深度的改变,水下的光线会产生一定的变化,会呈现出非均匀光照的特点;由于水中存在许多杂质和浮游粒子,会对水中的能见度产生比较大的影响,同时随着能见度的降低,探测距离也随之降低;水是天然的蓝绿滤波器,水下色彩会出现降维的特点;由于海流的作用,使得载体随波运动,从而造成图像模糊和不稳定的特点。

6) 水下无人系统自主与智能技术。

为了满足未来民用和军用的需求,智能水下机器人需要具备足够的自主能力以保证其能够在作业过程中根据周围形势的变化及时作出正确的决策。自主能力的增强将会大大提高智能水下机器人系统作业的效率,降低风险,适时根据自身状态及外部环境的变化作出调整,从目前脚本式智能转变为自适应智能。

3 国内智能水下机器人的发展方向

1) 多水下无人系统的协同技术。

与单一智能水下机器人相比较而言,多水下机器人系统凭借其空间上的分布性、执行任务的多样性、执行过程中的鲁棒性可以更加高效地完成作业使命,因而成为目前智能水下机器人系统领域的重点研究内容之一。美国已开展了多项多水下机器人系统协同环境探测试验,国内哈尔滨工程大学也已经对该方面进行研究,并完成了国内首次3个智能水下机器人的海上协同编队试验和双水下机器人海上协同探测演示试验,图13所示为国内哈尔滨工程大学的多智能水下机器人协同编队。

2) 混合式智能水下机器人。

混合式智能水下机器人是新一代智能水下机器人的发展方向,具有可操控作业和自主作业两种不同的作业模型,可以应用于水下石油和天然气开采工业和输油管线检查中。在进行水下石油开采作业时,可以开启操控作业模式,方便操作者对作业过程进行控制。进行输油管线检查时,可以切换到自主作业模式,对输油管线进行长距离的检测。混合式智能水下机器人还有很多应用的方面,如水下考古、水下打捞作业等。图14^[10]所示美国的Nereus混合式智能水下机器人。

3) 智能水下机器人系列化、商业化。

国内的智能水下机器人需要从研



图13 多智能水下机器人协同编队试验

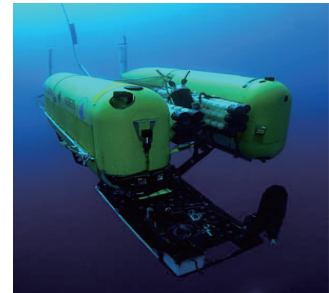
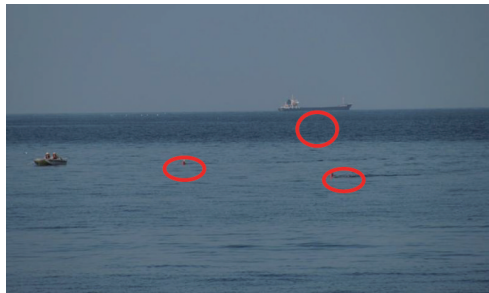


图14 Nereus 混合式智能水下机器人

发、演示阶段逐渐转变为商业化、系列化阶段,这样才能有更好、更长远的发展。国内的智能水下机器人目前仍处在实验验证阶段,距离商业化,还有很长的一段路要走。商业化最重要的一点是稳定性,这也是目前国内智能水下机器人比较欠缺的地方,需要在稳定性方面多做一些工作。

4 结论

目前智能水下机器人已经在经济和军事领域的应用中崭露头角,是完成水下观察和水下作业的重要手段,同时也是世界各国十分重视的技术领域,正处于飞速发展的阶段。国内的智能水下机器人研究起步比较晚,仍处于科研

阶段,距离产品化还有一段路要走。中国要在这一领域赶上世界领先水平,增强在海洋领域的技术竞争力,需要加大投入,有组织、有计划地促进该领域的研究,充分利用现有的技术基础与技术成果,避免低水平技术的重复,造成人力和物力的浪费。

参考文献(References)

- [1] von Alt C. Remus 100 transportable mine countermeasure package[C]. OCEANS 2003. Proceedings, San Diego, CA, USA, September 22-26, 2003.
- [2] Stokey R P, Roup A, von Alt C, et al. Development of the REMUS 600 autonomous underwater vehicle[C]. OCEANS, 2005. Proceedings of MTS/IEEE, Washington, DC, September 17-23, 2005.
- [3] Purcell M, Gallo D, Sherrell A, et al. Use of REMUS6000 AUVs in the search for the air France flight 447[C]. OCEANS 2011, Waikoloa, HI, September 19-22, 2011. [4] Stone L D, Keller C M, Kratzke T M, et al. Search for the wreckage of Air France Flight AF447[J]. Statistical Science, 2014, 29(1): 69-80.
- [4] Storkersen N, Kristensen J, Indreeide A, et al. Hugin-UUV for seabed surveying[J]. Sea Technology, 1998, 39(2): 99-104.
- [5] Gustafson E, Jalving B, Engelhardtisen Ø, et al. HUGIN1000 arctic class AUV[C]//Proceedings of Arctic Technology Conference Society of Petroleum Engineers. Houston, TX, 2001.
- [6] Vestgard K, Hansen R, Jalving B., et al. The HUGIN 3000 survey AUV[C]. The Eleventh International Offshore and Polar Engineering Conference, Stavanger, Norway, June 17-22, 2001.
- [7] 李一平, 封锡盛. “CR-01”6000m自治水下机器人在太平洋锰结核调查中的应用[J]. 高技术通讯, 2001, 11(1): 85-87.
- [8] 李平, 燕奎臣. “CR-02”自治水下机器人在定点调查中的应用[J]. 机器人, 2003, 25(4): 359-362.
- [9] Bowen A D, Yoerger D R, Taylor C, et al. The Nereus hybrid underwater robotic vehicle[J]. Underwater Technology, 2009, 28(3): 79-89.

Current status of autonomous underwater vehicles research and development

PANG Shuo, JIU Haifeng

National Key Laboratory of AUV Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China

Abstract With the development of robotic technology and the need of ocean exploration, the Autonomous Underwater Vehicle (AUV) technology becomes very active research field all over the world. This paper presents the research and development status of current AUV technology. The key technologies in the AUV research field and future prospective of AUV technology are also introduced in the paper.

Keywords AUV; current status; future prospective

基金项目:国家自然科学基金面上项目(61175095)

作者简介:庞硕,教授,研究方向为智能水下机器人技术,电子信箱:sspp27@hotmail.com;纠海峰(通信作者),博士研究生,研究方向为智能水下机器人嗅觉技术,电子信箱:jiuhaifeng@hotmail.com

(责任编辑 刘志远)